

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra pružnosti a pevnosti



**MKP analýza sdruženého snímače**

**FEM Analysis of the Combined Force Transducer**

Student:  
Vedoucí bakalářské práce:

František SEJDA  
Ing. František FOJTÍK, Ph.D.

Ostrava 2012

## Zadání bakalářské práce

Student: **František Sejda**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika  
Téma: MKP analýza sdruženého snímače  
FEM Analysis of the Combined Force Transducer

Zásady pro vypracování:

1. Dle dostupné literatury navrhnete vhodnou konstrukci sdruženého snímače.
2. Vytvořte MKP model snímače.
3. Stanovte okrajové podmínky řešeného modelu.
4. Proveďte napěťově deformační analýzu snímače.
5. Navrhnete vhodné rozmístění tenzometrů na snímači.

Seznam doporučené odborné literatury:

STEFANESKU, D., M.: Handbook of Force Transducers – Principles and Components, Springer, 2011, ISBN 978-3-642-18295-2.

KOLÁŘ, V., NĚMEC, I., KANICKÝ, K. FEM - Principy a praxe metody konečných prvků. Brno: Computer Press, 1997.

DEJL, Z. Konstrukce strojů a zařízení I., Spojovací části strojů, návrh, výpočet, konstrukce, Ostrava: MONTANEX a.s., 2000.

LENERT, J. Úvod do metody konečných prvků. 1. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1999.

Ansys Inc. Documentation for ANSYS Release 13.0. SAS IP, Inc., 2011.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. František Fojtík, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011  
Datum odevzdání: 21.05.2012



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne: .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : .....

.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

František Sejda

Adresa trvalého pobytu autora práce:

N. Frýda 153/14  
Ostrava  
700 30

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ RPÁCE**

SEJDA, F., *MKP analýza sdruženého snímače: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra pružnosti a pevnosti, 2012, 40 s. Vedoucí práce: Ing. František Fojtík, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá MKP analýzou sdruženého snímače. V úvodu jsou popsány různé druhy snímačů se zaměřením na snímače s kombinovaným namáháním, nejvíce pak na snímače sloupcovitého a diskového tvaru. Na navržený snímač jsou následně aplikovány okrajové podmínky a je podroben napětově deformační analýze. V poslední části je zhotoven návrh příruby a možnosti uchycení konektoru.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

SEJDA, F., *FEM Analysis of the Combined Force Transducer: Bachelor Thesis*. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics of Materials, 2012, 40 p. This thesis is led by: Ing. František Fojtík, Ph.D.

This thesis deals with the FEM analysis of the combined sensor. The introduction describes the different types of sensors with focus on sensor combined with stress, mostly on the sensor disk and columnar shape. The designed transducer is then applied boundary conditions and is subjected to stress deformation analysis. In the last part of the proposal is made and flange mounting options connector.

Děkuji Ing. Františku Fojtíkovi, Ph.D, za vedení a metodickou pomoc, kterou mi poskytl při zpracování bakalářské práce

## Seznam použitého značení, termínů a zkratk

F	označení síly
E	modul pružnosti materiálu v tahu; [MPa]
HB	jednotka tvrdosti dle Brinella
HMH	pevnostní hypotéza pro výpočet redukovaného napětí
M <sub>k</sub>	označení krouticího momentu
MPa	mega pascal, jednotka napětí
N	Newton, jednotka síly
Nm	Newton metr, jednotka velikosti momentu, 1 Nm=1 000 Nmm
Re	mez kluzu, [MPa]
Rm	mez pevnosti, [MPa]
P	rozteč; [mm]
U <sub>m</sub>	výstupní napětí, [V]
U <sub>b</sub>	vstupní napětí; [V]
$\beta$	vrcholový úhel profilu závitu; °
$\gamma$	úhel stoupání závitu; °
$\varepsilon$	deformace
$\sigma$	normálové napětí; [MPa]
$\tau$	tečné napětí; [MPa]
$\mu$	Poissonovo číslo

**OBSAH**

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>TYPY SNÍMAČŮ .....</b>	<b>10</b>
2.1	Sdružený snímač .....	10
2.2	Sdružené snímače sloupcovitého typu.....	11
2.3	Trubkové snímače.....	12
2.3.1	Profily trubic .....	12
2.3.2	Trubky s otvory nebo s drážky .....	14
2.4	Snímač typu disk.....	16
2.4.1	Snímače od firmy Interface .....	19
2.4.2	Snímač firmy ATI - Theta .....	20
<b>3</b>	<b>NÁVRH SNÍMAČE .....</b>	<b>21</b>
3.1	Sít' pro model snímače.....	23
<b>4</b>	<b>MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI A OKRAJOVÉ PODMÍNKY .....</b>	<b>24</b>
4.1	Geometrické okrajové podmínky .....	24
4.2	Kontrola navržených šroubů .....	25
4.3	Statické okrajové podmínky .....	26
<b>5</b>	<b>NAPĚŤOVĚ DEFORMAČNÍ ANALÝZA.....</b>	<b>28</b>
5.1	Napět'ově deformační analýza od zatěžující síly .....	28
5.2	Napět'ově deformační analýza od Momentu M .....	29
5.3	Výpočet napětí a deformace při působení momentu i síly .....	31
<b>6</b>	<b>ROZMÍSTĚNÍ TENZOMETRŮ NA SNÍMAČI .....</b>	<b>33</b>
6.1	Schéma rozmístění tenzometrů.....	35
<b>7</b>	<b>PŘIPOJENÍ SNÍMAČE .....</b>	<b>36</b>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>39</b>



## 1 Úvod

Tenzometrický snímač slouží k měření fyzikálních veličin, které vyvolávají deformace materiálů. Je důležité, aby těleso bylo navrženo tak, aby byl snímač dostatečně citlivý a tuhý pro požadovaný měřicí rozsah. Tuhost je vyžadována proto, aby deformace snímače neovlivnila vlastní měření. Měrný člen snímače je osazen tenzometry, které slouží k výpočtu deformace. Výpočet je možné realizovat pomocí postupů klasické pružnosti a pevnosti, nebo použitím metody konečných prvků MKP, která je vhodná u složitějších tvarů.

Přesnost měření deformací je dána typem použitého tenzometru (fóliový, drátkový, uhlíkový, polovodičový), zatěžujícím členem a měrným členem. Při měření s vyššími teplotními změnami je třeba dávat pozor na změny modulu pružnosti a na změny k-faktoru.

V teoretické části této práce je uveden přehled v současnosti používaných snímačů s působením kombinovaného namáhání. Na základě této studie je navržen snímač diskového typu, který je podroben MKP analýze, která je potřebná pro zjištění vhodných míst pro nalepení tenzometrů.

## 2 Typy snímačů

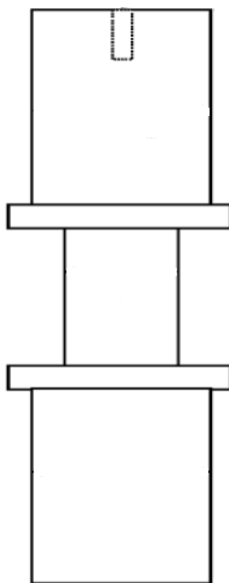
Snímač je takové zařízení, které se užívá pro zjišťování stavů, vlastností látek a fyzikálních veličin k jejich pozorování a snímání. Používá se v širokých oblastech činností jako například:

- Snímač otisků prstů
- Snímač čárového kódu
- Ultrazvukový snímač
- Hladinový snímač
- Snímač teploty
- Snímač pohybu
- Snímač polohy

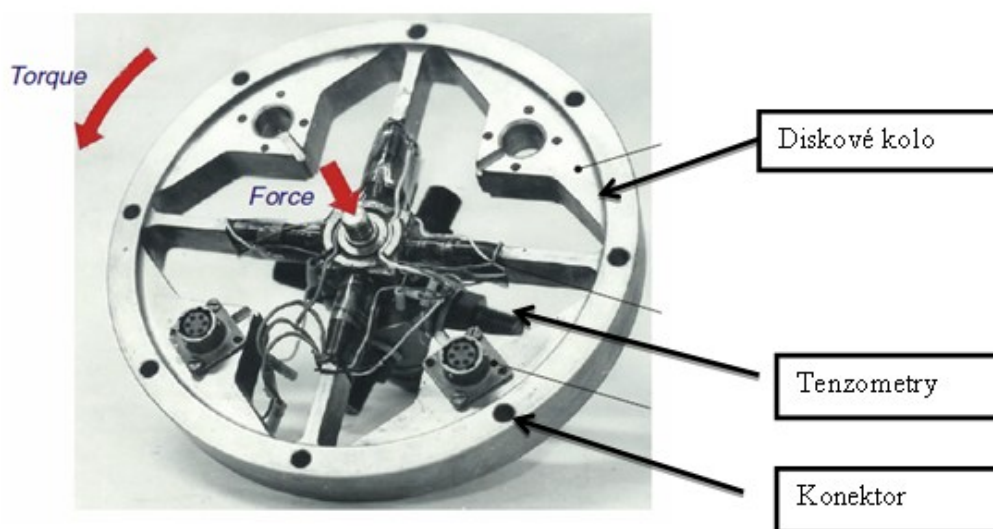
### 2.1 *Sdružený snímač*

Je založen na principu měření síly a momentu. Nejčastější konstrukce jsou:

- a) sloupcovité těleso (obr. 2.4)
- b) diskové těleso (obr. 2.5)



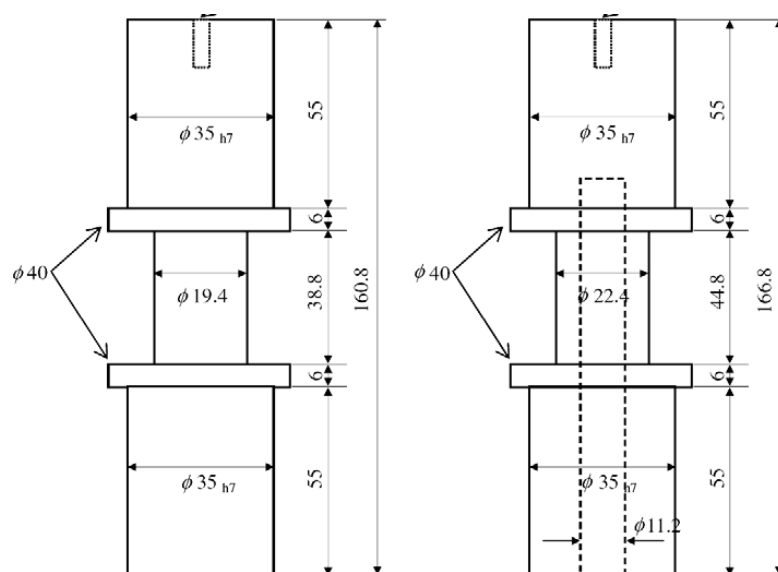
Obr. 2.4 Sloupcovité sdružený snímač



Obr. 2.5 Sdružený snímač diskového typu [1]

## 2.2 Sdružené snímače sloupcovitého typu

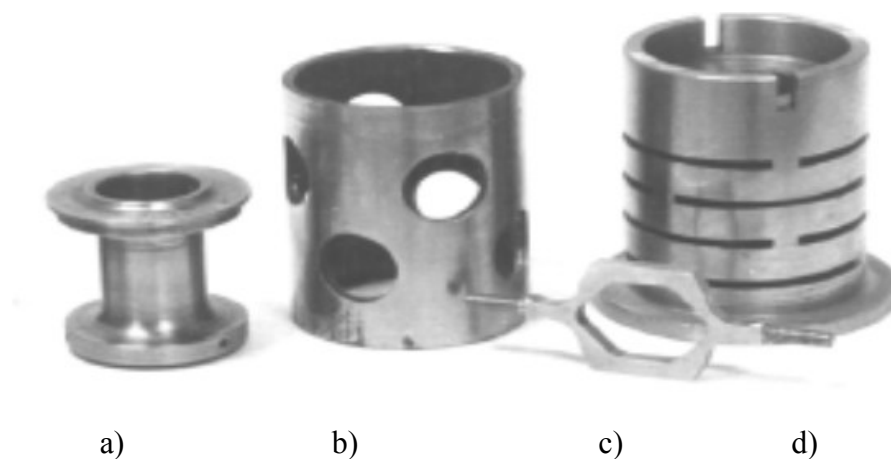
Klasický snímač sloupcovitého tvaru je široce uplatňován, vzhledem ke své tuhosti, zejména v dynamických aplikacích. Příkladem je válcová tyč – systém pro určování složitých hydrodynamických sil. Existují dva typy těchto snímačů, které mohou měřit složky sil  $F$  ( $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ ) a momentové složky  $M$  ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ). První má pevný snímací válcový prvek a druhý dutý válcovitý tvar, vyrobený ze speciální NiCrMo (Niklochromomolybdenová) slitiny.



Obr. 2.6 Sloupcovité snímače – plného i dutého tvaru [1]

## 2.3 *Trubkové snímače*

Jedná se vlastně o dutý válec. Trubka umožňuje snadné zpracování různých rozměrů z dostupných materiálů. Je méně citlivá na ohyb, krut a vzpěr než válec a umožňuje lepší instalaci do testovaného zařízení.

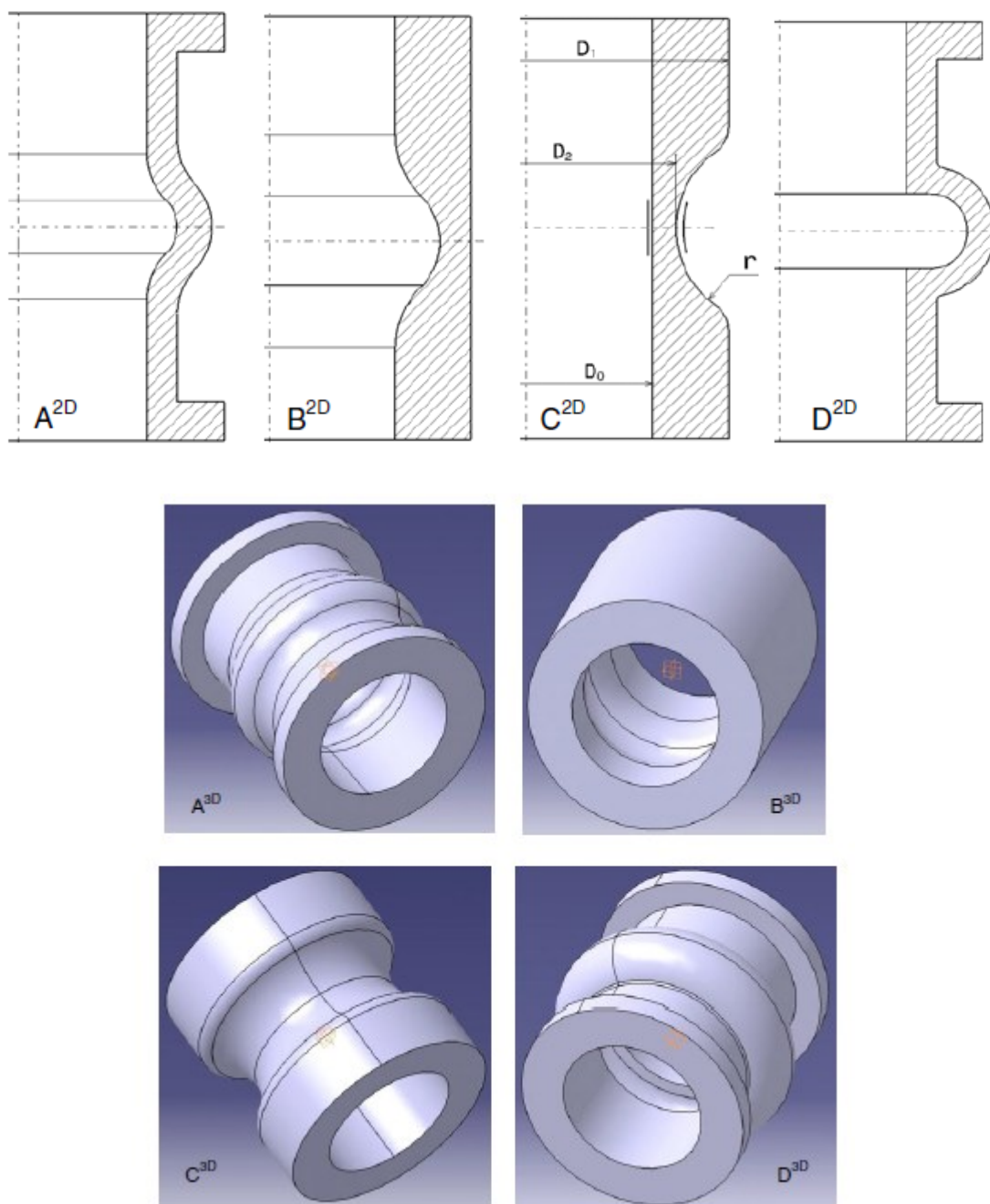


Obr. 2.8 Upravené trubky; [1]:

- a) klasická trubka
- b) trubka s dírami
- c) hexagonální prsten
- d) trubka s otvory

### 2.3.1 *Profily trubic*

V závislosti na požadavky strukturální pevnosti a tenzometrickou citlivost mohou být navrženy různé tvary. Například spojením dvou různých průměrů rotujícími částmi, nebo spojení kuželem a dalších prvků. Obrázek 2.9 představuje čtyři komplexní trubkové formy o průměru měnícím se okolo středu.



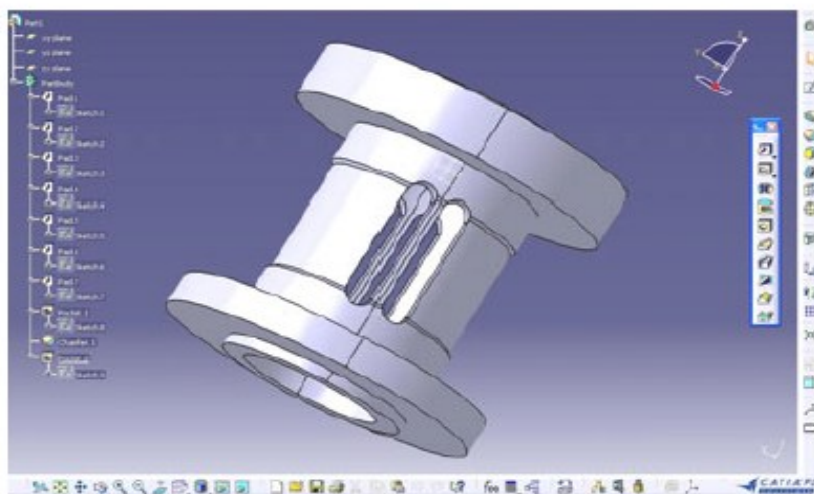
Obr. 2.9 2D a 3D zobrazení čtyř modelů trubek [1]

Klasické trubky jsou monolitické, navrženy z jednoho kusu pro snadnou výrobu, ale se sníženou tenzometrickou citlivostí. V Wheastonově můstku jsou dva tenzometry aktivní, další dva jsou hlavně pro kompenzaci teploty a mají pouze příčnou citlivost (Poissonův koeficient:  $\nu = 0,3$ ). U těchto nových konstrukcí neexistují analytické vzorce, takže je vhodné uvést konečno-prvkový model. Geometrie a umístění tenzometrů jsou navrhovány také pomocí metody konečných prvků.

### 2.3.2 Trubky s otvory nebo s drážky

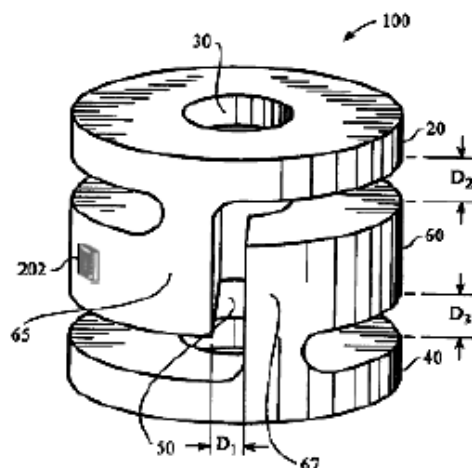
Zvýšení citlivosti je možné dosáhnout také zavedením koncentrátorů (otvory a drážky různých tvarů a velikostí):

- Pouzdro s 24 bočními otvory pro vícesložkové síly a točivý moment,
- Kruhové hrdlo trubky (s dvěma řadami rozmístěných do čtyř stejně vzdálených otvorů),
- Trubka s dvěma řadami proloženými obdélníkovými otvory, pojmenovaná Octoplus,
- Trubka s výřezem ve tvaru L – využití v robotice ,
- Trubka s vertikálními drážkami (obr.2.11).



Obr. 2.11 Trubka se svislými drážkami [1]

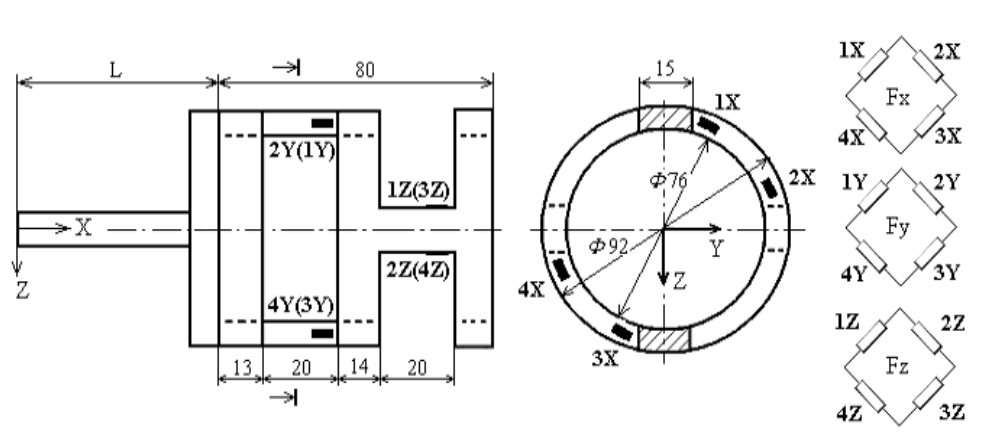
Spirálový snímač obsahuje první pár snímačů podél neutrální osy šroubovitě cívky (obr. 2.12). Druhý pár snímačů se diametrálně liší ve vztahu k prvnímu páru. Citlivost na boční zatížení je eliminována druhou dvojicí snímačů. V jiném provedení je každý ze snímačů v tomto pořadí orientován rovnoběžně a kolmě k neutrální ose cívky.



Obr. 2.12 Spirálový snímač [1]

Jiný navržený prvek (obr. 2.13) byl vyroben z trubky, v níž byly vyřezány čtyři drážky.

V důsledku toho byly získány tři kroužky spojené čtyřmi svazky (dva v horizontálním směru a další dva ve svislém). Tři plné Wheatstone můstky měří složky  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ .



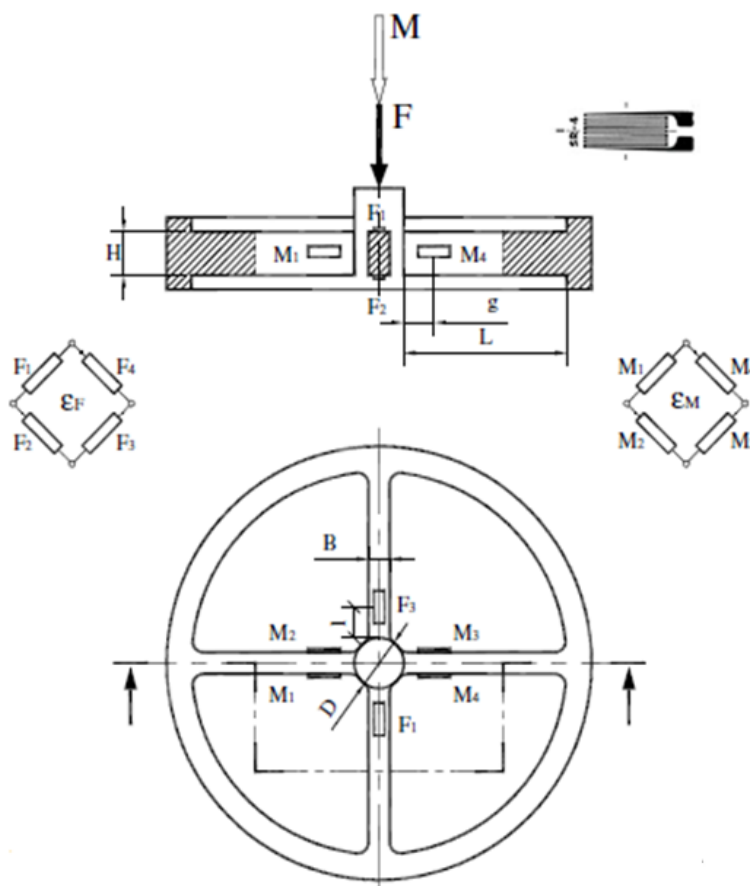
Obr. 2.13 Drážkovaná trubice [1]

## 2.4 Snímač typu disk

Pomocí rovných tyčí nebo paprsků, s oběma konci pevně přichycenými a vloženými ve středu se soustřednou zátěží, vzniká na povrchu rovina napjatosti, kde se nachází tenzometry pro měření :

- Ohybu – tenzometry jsou umístěny podélně
- Smyku – tenzometry jsou otočeny o  $\pm 45^\circ$

Obecně lze říci, že napětí v ohybu má vyšší citlivost než napětí smykové. Tenzometrické údaje závisí na poloze tenzometru na nosníku, správném umístění, které je nutné pro získání maximální citlivosti.

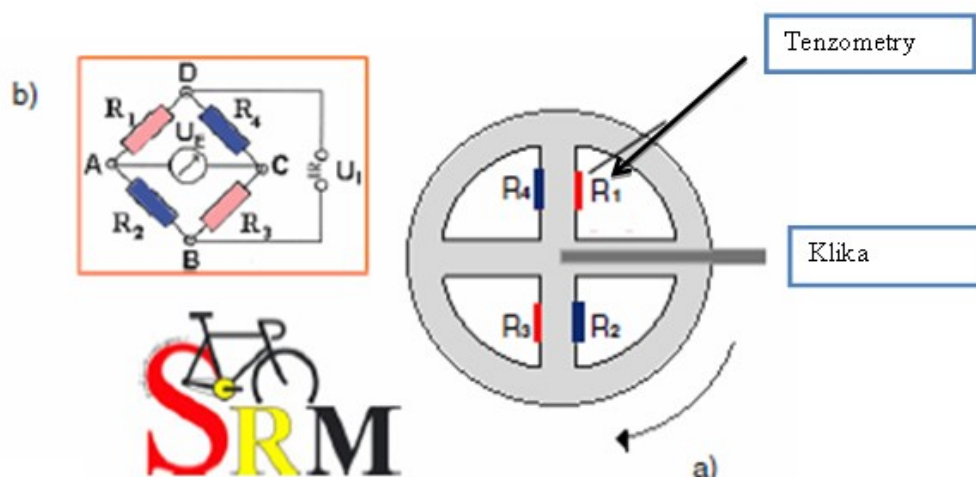


Obr. 2.14 Schéma rozmístění tenzometrů a jejich připojení do Wheatstonova můstku [1]

Citlivost může být zvýšena drážkou pružných lamel a stavebními flexory, které odstraňují účinky nepříznivého zatížení.

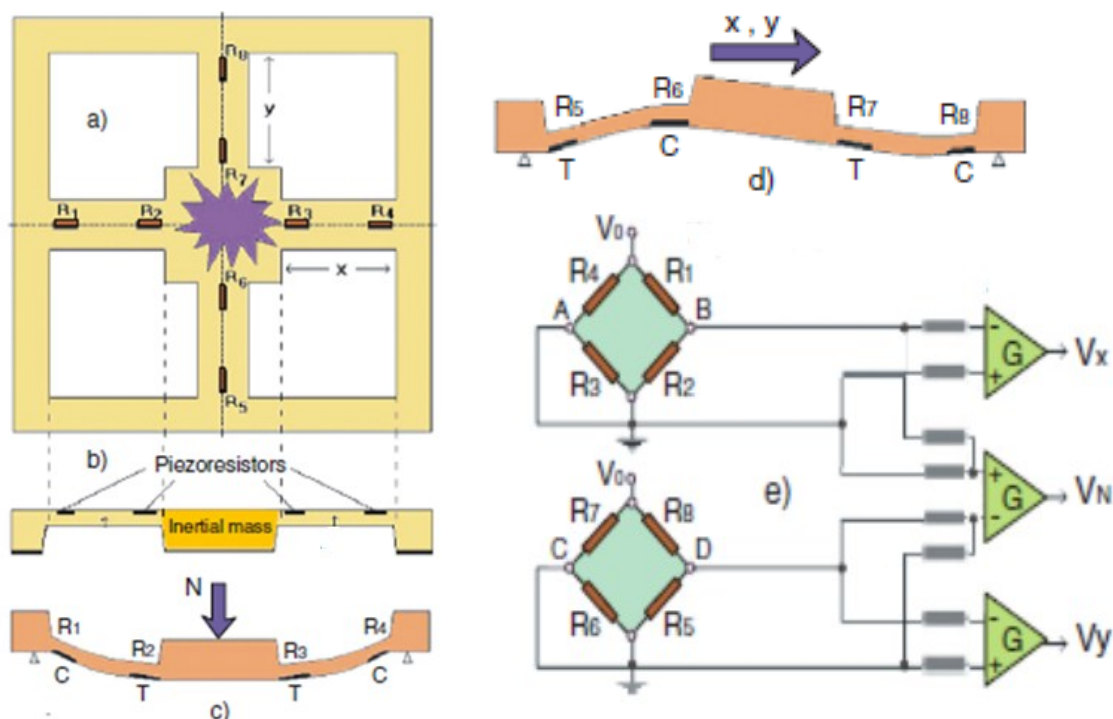


SRM je nejmodernější zařízení pro zobrazení, shromažďování a analýzu údajů o výkonu v cyklistice. Jak je znázorněno na obrázku 2.17a, hlavní složkou měřicího systému je tenzometrická klika (Powermeter), která pedálem umožňuje rychlost, efektivní točivý moment a výkon, který se měří na všech typech jízdních kol. Pásky tenzometrů jsou připojeny na kov uvnitř kliky a měří jakou sílu je třeba na zdvih celého pedálu. Tenzometry jsou připojeny do Wheatstone můstku (obr. 2.17b), který je „univerzální“ v oblasti elektromechanického měření sil a souvisejících mechanických veličin. Zařízení SRM používají všechny špičkové cyklistické závodní týmy, např. Astana, Lampre, Liquigas, FDJ, Saxo bank, Quickstep a jiné.



Obr. 2.17 Svislé paprskové kolo s tenzometry využíváno v cyklistice [1]

I. Pavelescu představil v roce 2002 čtvercovou verzi paprskového kola a 3D akcelometru z křemíku, postavený ze čtyř pružných nosníků umístěných na osách symetrie. Horní a řezové pohledy jsou znázorněny na obr. 2.18a a 2.18b. Tato konstrukce vznikla mikroobráběním křemíku, pomocí piezodoporového efektu, který se vyskytuje v rozptýleném křemíku. Normálové a smykové napětí lze získat kombinací osmi piezodoporů nacházejících se na příslušných pozicích na křemíkových nosnících.



Obr. 2.18 Čtvercová verze paprskového kola

- a) pohled shora;
- b) řez
- c) normální zatížení;
- d) boční zatížení;
- e) tenzometry v Wheatstone mostu spojené operačním zesilovačem [1]

Pokud je zařízení podrobena zrychlení, normálové a smykové síly se aplikují do profilu nosníku. Když působí normálová síla  $N$  (obr. 2.18c) tenzometry se nachází v blízkosti setrvačné hmoty ( $R_2, R_3, R_6$  a  $R_7$ ) představují pevnost v tahu a hodnota odporu vzroste, opačně konají odpory nacházející se v blízkosti krajů ( $R_1, R_4, R_5$  a  $R_8$ ). Při uplatnění postranního ( $x$  nebo  $y$ ) zrychlení (obr. 2.18d) odpory  $R_1, R_3, R_5$  a  $R_7$  představují pevnost v tahu a hodnoty odporu se zvýší, rezistory  $R_2, R_4, R_6$  a  $R_8$  prezentují namáhání v tlaku a odporové hodnoty se sníží, a naopak.

### 2.4.1 Snímače od firmy Interface

- Snímač s vnitřní elektronickou identifikací
- Splňuje požadavky IEEE normy 1451.4
- Dostupný na nové i stávající typy snímačů
- S funkcí Plug & Play
- Eliminuje chyby zadávání dat
- Čidlo kalibračních dat



Obr. 2.19 Snímač vyrobený firmou Interface [3]

### Model 1216

Model 1216 je nejlepší ve své třídě kvůli těmto vlastnostem:

- měří zatížení i točivý moment,
- únavové hodnocení,
- vnější zatěžovací odpor.



Obr. 2.20 Snímač vyrobený firmou Interface [3]

### 2.4.2 Snímač firmy ATI - Theta



Obr. 2.21 Snímač IP60 firmy Ati-Theta [3]

Maximální přípustné přetížení 4,8 až 17,6 jmenovitého výkonu. Křemíkové tenzometry poskytují signál 75 krát silnější než běžné fóliové tenzometry. Tento signál je zesílen, což vede k téměř nulové hladině šumu ( zkreslení ).

Verze IP60 je určena pro použití v prašném prostředí, IP65 je voděvzdorná verze snímače a snímač IP68 je voděodolná verze použitelná do 10 metrové hloubky. Nejčastější použití:

- V robotice
- Ortopedickém výzkumu

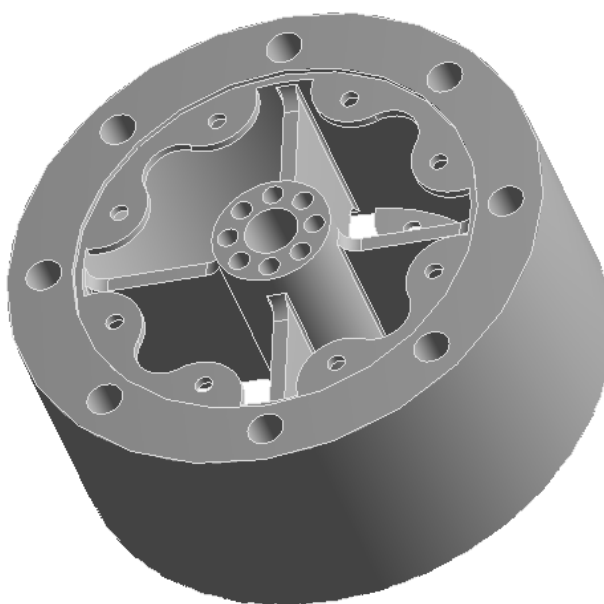
V tabulce jsou uvedeny přípustné parametry zatížení uváděny výrobcem

<b>Jednoosé zatížení</b>	
<b>F<sub>xy</sub></b>	<b>±20000 N</b>
<b>F<sub>z</sub></b>	<b>±51000 N</b>
<b>T<sub>xy</sub></b>	<b>±2000 Nm</b>
<b>T<sub>z</sub></b>	<b>±2000 Nm</b>

Tabulka : Parametry snímače uvedené firmou Ati-Theta; [3]

### 3 Návrh snímače

Na základě studie sdružených snímačů, popsané v kapitole 2 byl navržen model snímače (obr.3.1), který byl poté podroben analýze, ta je podrobně popsána v kapitole 5. Snímač byl navržen s ohledem na zadané zatížení, a to konkrétně sílu  $F = 100\,000\text{ N}$  a moment  $M = 500\,000\text{ Nmm}$ . Návrh a analýza snímače byla provedena v programu Ansys Workbench 13.

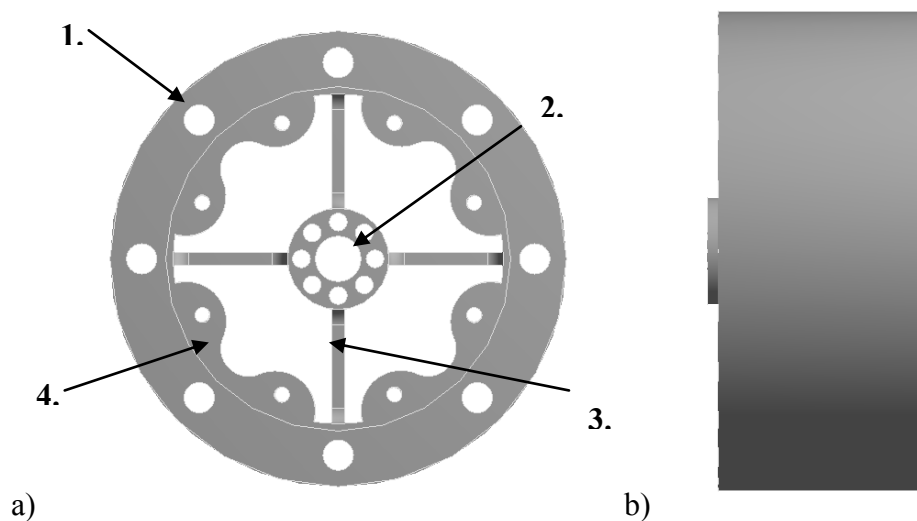


Obr. 3.1 Navržený snímač

Snímač má tři hlavní části, které byly během zpracovávání několikrát změněny. Jejich poloha je zobrazena na obrázku 3.2.

Jsou to:

1. Velké kolo
2. Střední mezikruží
3. Paprsky
4. Plochy pro konektory

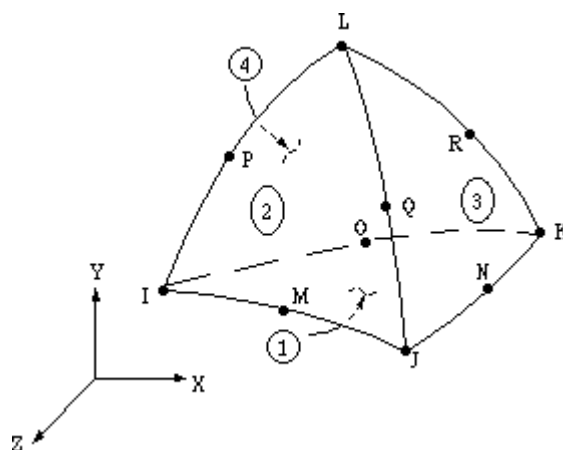


Obr. 3.2 Navržený model snímače, a) pohled zepředu, b) pohled z boku

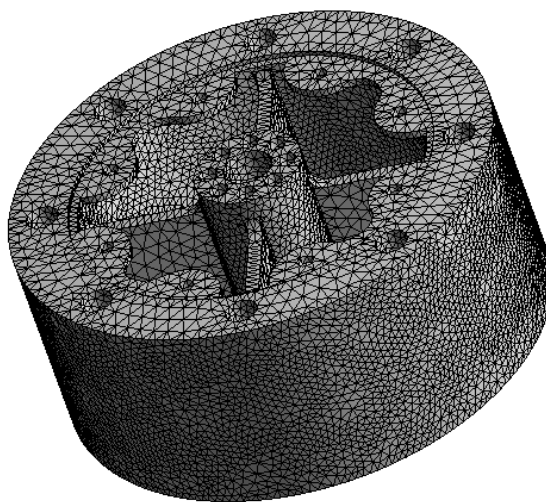
Z hlediska výpočtu jsou nedůležitější základní rozměry paprsků, tedy šířka a výška. Na tyto plochy budou později přilepeny tenzometry. Postup úpravy a nalezení vhodného místa pro jejich umístění je popsán v kapitolách 5 a 6.

### 3.1 Sít' pro model snímače

Model je rozložen na podoblasti (konečné prvky), na které budou aplikovány okrajové podmínky. Poté bude spuštěn samotný výpočet. Cílem je najít optimální velikost napětí pro přilepení tenzometrů. Sít' je tvořena prvky solid 92/187 s 171 578 uzly a 99 502 elementy.



Obr. 3.3 20-ti uzlový element solid 187 [5]



Obr. 3.4 Generovaná sít' v programu Ansys Workbench 13

## 4 Materiálové vlastnosti a okrajové podmínky

Materiál snímače byla volena ocel 15 230.8, materiálové vlastnosti zvoleného materiálu, jsou uvedeny v tabulce 1.

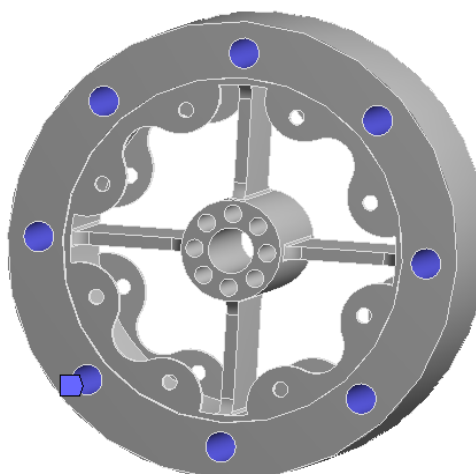
<b>Modul pružnosti v tahu E</b>	$2,1 \cdot 10^5$	<b>MPa</b>
<b>Poissonovo číslo</b>	0,3	
<b>Mez kluzu</b>	970	<b>MPa</b>
<b>Mez pevnosti</b>	1180	<b>MPa</b>

Tabulka 1: Materiálové vlastnosti oceli 15 230.8; [8]

### 4.1 Geometrické okrajové podmínky

Pro náš případ máme geometrické okrajové podmínky i statické okrajové podmínky. Geometrické okrajové podmínky jsou zastoupeny 8 šrouby M12, s mezí pevnosti 300 MPa, na vnějším průměru ( na obrázku znázorněny modrou barvou ), kterým je snímač přichycen. Při statické analýze metodou konečných prvků musí být zabráněno pohybu snímače jako tuhého celku, a tak bylo v dírách pro šrouby zabráněno pohybu ve všech směrech.

A: Static Structural  
Fixed Support  
Time: 1, s  
 Fixed Support



Obr. 4.1 Uchycení snímače v dírách pro šrouby



## 4.2 *Kontrola navržených šroubů*

Pro vlastní výpočet je třeba několik vzorců :

$$\text{Úhel stoupání závitu} \quad \gamma = \arctg\left(\frac{P_h}{\pi \times d_2}\right) \quad [6]$$

$$\text{Úhel součinitele tření v závitové drážce} \quad \varphi' = \arctg\left(\frac{f_z}{\cos \frac{\beta}{2}}\right) \quad [6]$$

$\beta$  – vrcholový úhel profilu závitu

$$\text{normálové napětí} \quad \sigma_t = \frac{F}{\frac{\pi \times d_3^2}{4}} \quad [6]$$

$$\text{tečné napětí} \quad \tau = \frac{M_k}{W_k} = \frac{F_1 \times \frac{d_2}{2} \times \operatorname{tg}(\gamma + \varphi)}{\frac{\pi \times d_3^3}{16}} \quad [6]$$

$$\text{redukované napětí} \quad \sigma_{red} = \frac{Re}{k_s} \quad [6]$$

Šroub M12 x 1 má tyto rozměry :  $d=12$  mm,  $d_2=11,350$  mm,  $d_1=10,917$  mm,  $d_2=10,773$  mm

Zatěžující síla  $F = 100\,000$  N

Zatěžující síla pro jeden šroub  $F_1 = 1,2 \times \frac{F}{8} = 15000$  N

$$\gamma = \arctg\left(\frac{P_h}{\pi \times d_2}\right) = \arctg\left(\frac{1}{\pi \times 11,350}\right) = 1,606$$

$$\varphi' = \arctg\left(\frac{f_z}{\cos \frac{\beta}{2}}\right) = \arctg\left(\frac{0,1}{\cos 30}\right) = 6,587$$

$$\sigma_t = \frac{F}{\frac{\pi \times d_3^2}{4}} = \frac{4 \times 15000}{\pi \times 10,773^2} = 164,561 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} = \frac{F_1 \times \frac{d_2}{2} \times \operatorname{tg}(\gamma + \varphi)}{\frac{\pi \times d_3^3}{16}} = \frac{15000_1 \times \frac{11,350}{2} \times \operatorname{tg}(1,606 + 6,587)}{\frac{\pi \times 10,773^3}{16}} = 49,924 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_t^2 + 3\tau^2} = \sqrt{164,561^2 + 3 \times 49,924^2} = 185,897 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{red} = \frac{R_e}{k_s} \quad k_s = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{300}{185,897} = 1,61$$

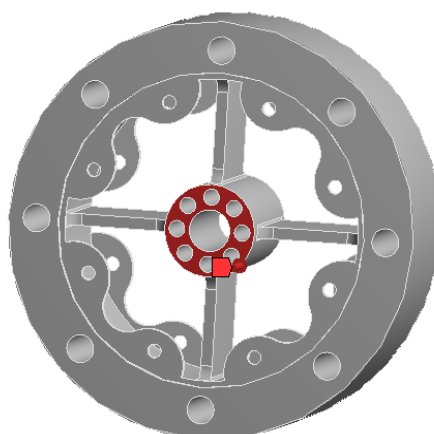
Bezpečnost  $k_s$  by se měla pohybovat v rozmezí 1,4 – 2,5. Vypočtená hodnota bezpečnosti 1,61 vyhovuje této podmínce a šrouby je možno použít.

### 4.3 Statické okrajové podmínky

Statické okrajové podmínky reprezentuje osová síla  $F$  o velikosti 100 kN působící na plochu mezikruží ( na obrázku je síla zobrazena červenou barvou na zatěžující ploše. )

$$F = 100\,000 \text{ N}$$

A: Static Structural  
Force  
Time: 1, s  
Force: 1.e+005 N  
Components: 0,, 0,, -1.e+005 N



Obr. 4.2 Umístění zatěžující síly  $F$

A momentem  $M$  o velikosti 500 Nm, který působí taktéž na plochu mezikruží.

$$M = 500 \text{ N} \cdot \text{m}$$

B: Static Structural

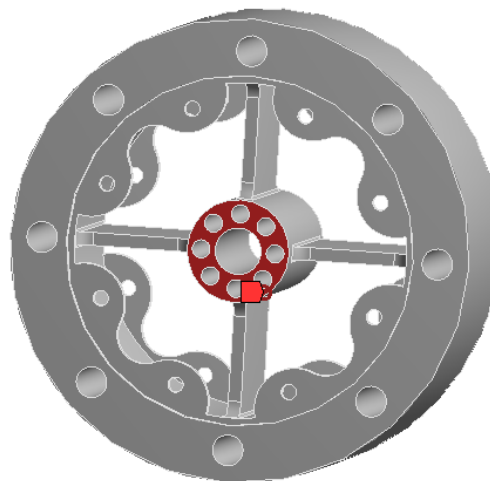
Moment

Time: 1, s



Moment: 5,e+005 N-mm

Components: 0,, 0,, 5,e+005 N-mm



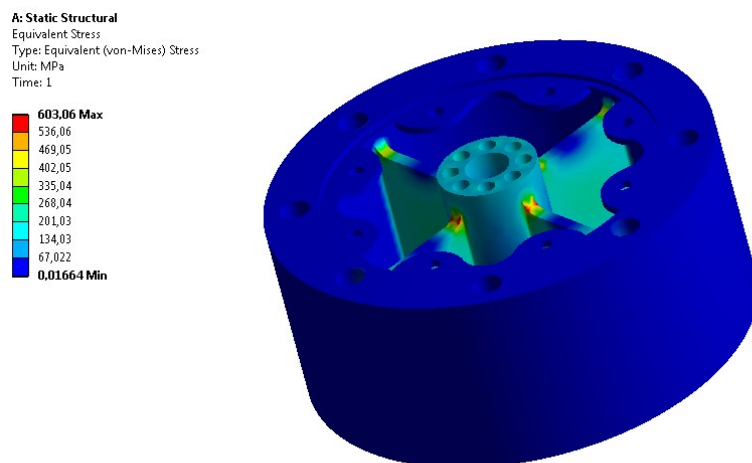
Obr. 4.3 Umístění zatěžujícího moment  $M$

Při navrhování bylo vyzkoušeno i jiné varianty umístění síly a momentu, s ohledem na to, aby se řešení blížilo reálu. Zvažována byla i varianta, kdy obě zatížení byla umístěna po vnitřním obvodu středního mezikruží. Nakonec bylo rozhodnuto pro toto uspořádání, neboť s ním bylo dosaženo lepších výsledků a více se podobá realitě.

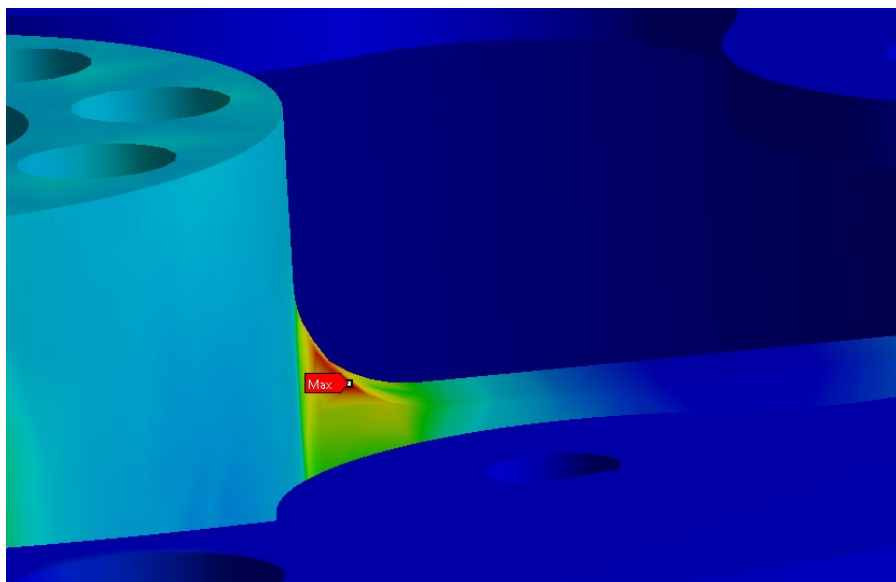
## 5 Napětově deformační analýza

Snímač byl navržen pro zadané hodnoty zatížení, silou a momentem. Výpočet pomocí metody konečných prvků je realizován v programu Ansys Workbench 13. Snímač je tvořen jedním tělesem, a tak se zde nevyskytují žádné kontakty.

### 5.1 *Napětově deformační analýza od zatěžující síly*



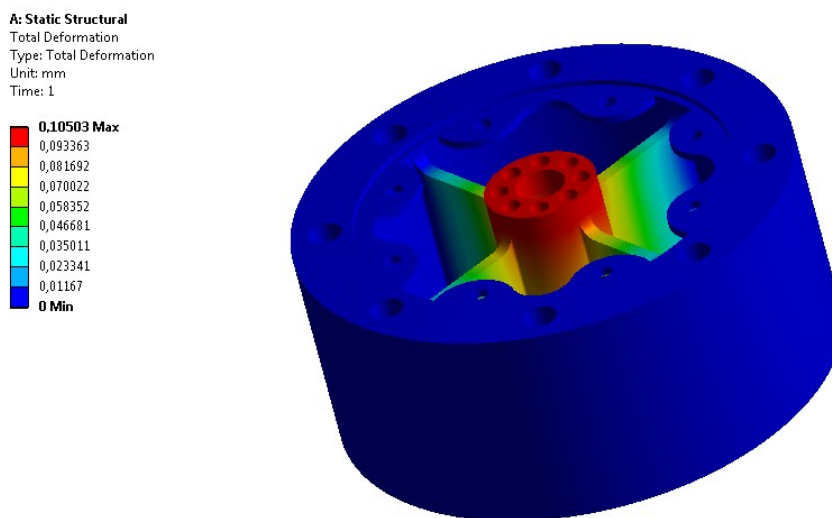
Obr. 5.1 Průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMM od zatěžující síly; [ MPa ]



Obr. 5.2 Místo s maximálním redukovaným napětím dle hypotézy HMM od zatěžující síly; [MPa]

Maximální napětí na snímači má hodnotu 603,06 MPa.

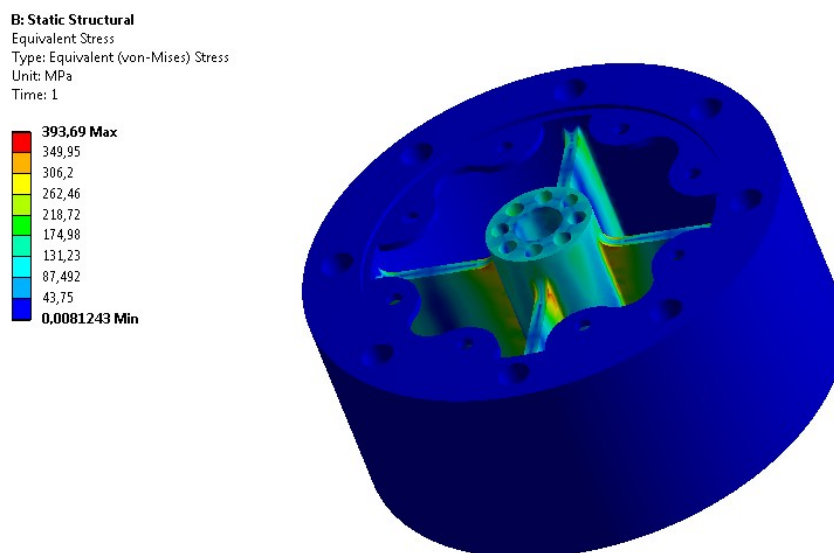
Maximální napětí se vyskytuje tam, kde se předpokládalo, tedy v místě přechodu paprsku a středového mezikruží. Toto místo bylo opatřeno rádiusem,  $r = 5 \text{ mm}$ , pro snížení napětí.



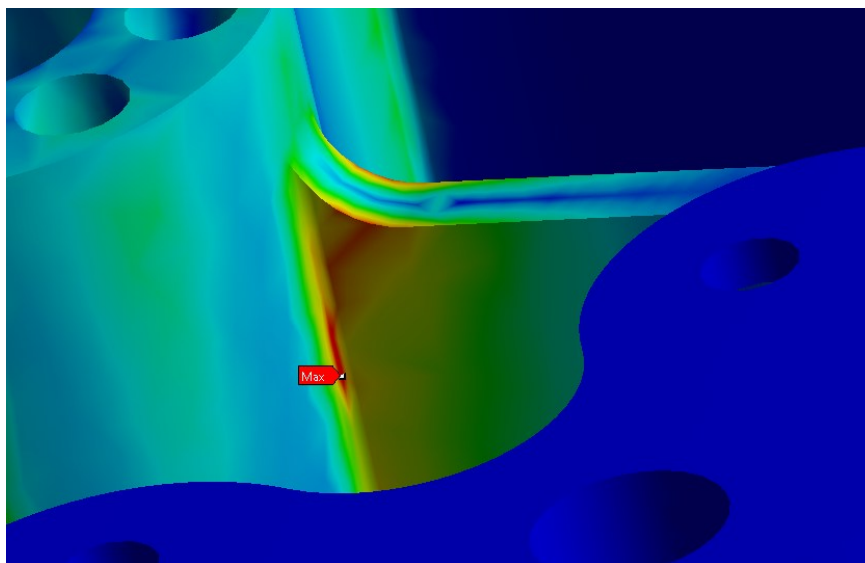
Obr. 5.3 Posunutí od síly; [ mm ]

Deformace na snímači, které vzniknou na snímači od zatěžující síly  $F$  jsou velké 0,105 mm

## 5.2 *Napět'ově deformační analýza od Momentu $M$*



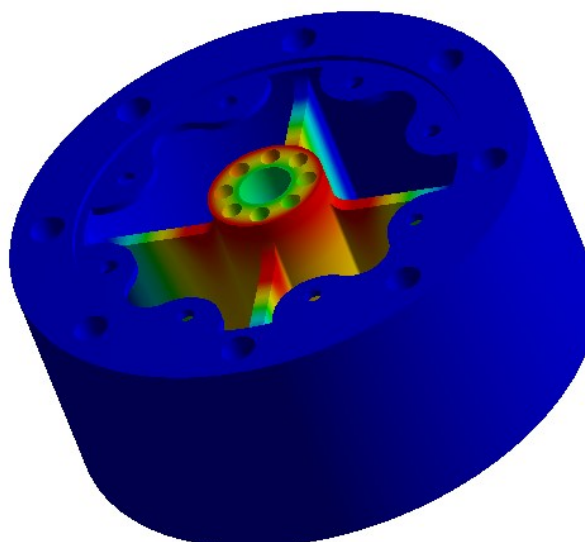
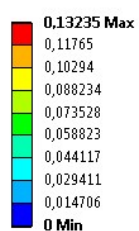
Obr. 5.4 Průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMM od Momentu  $M$ ; [ MPa ]



Obr. 5.5 Místo s maximálním napětím od zatěžujícího momentu; [ MPa ]

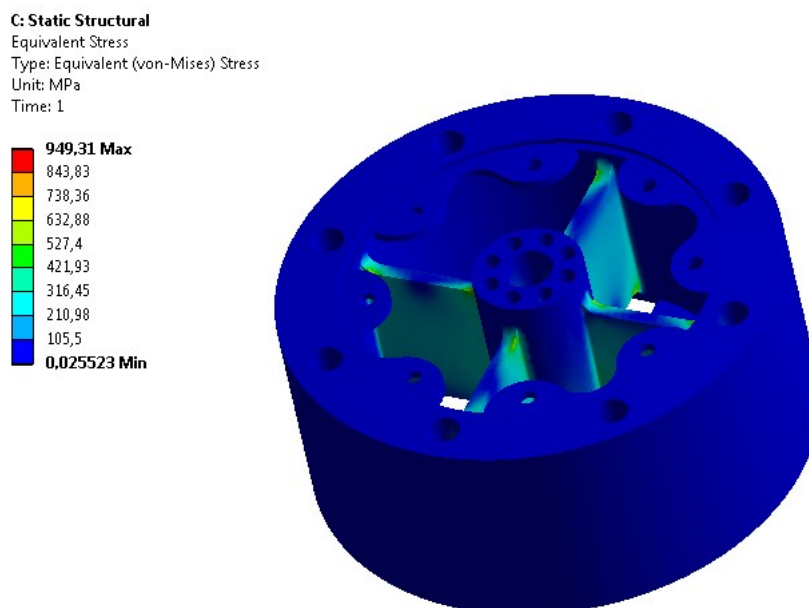
Maximální napětí od zatěžujícího momentu má hodnotu 393,06 MPa. Maximum se nachází na místě které bylo opatřeno rádiusem  $r = 1$  mm, který byl zaveden pro jeho snížení.

B: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1

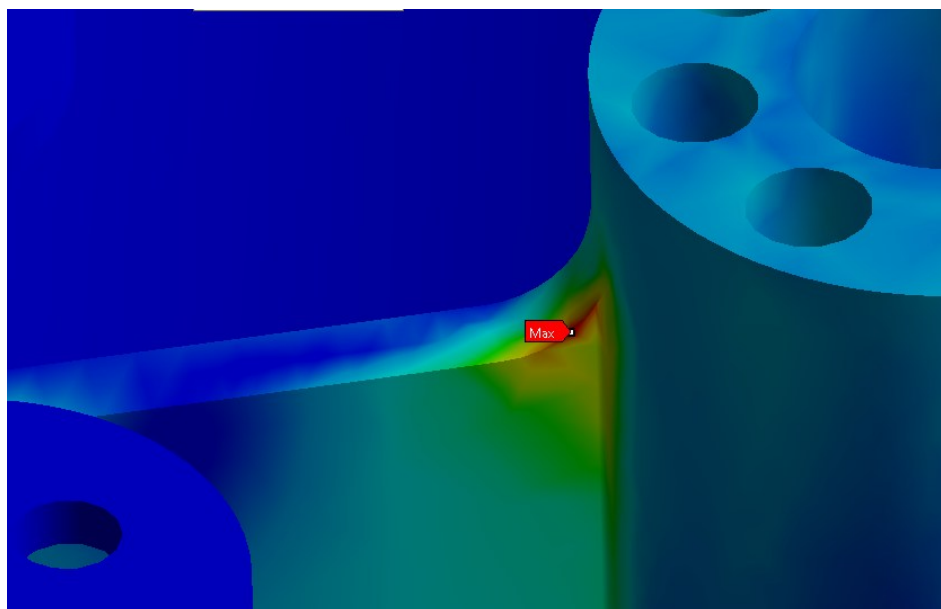


Obr. 5.6 Deformace způsobené momentem; [ mm ]

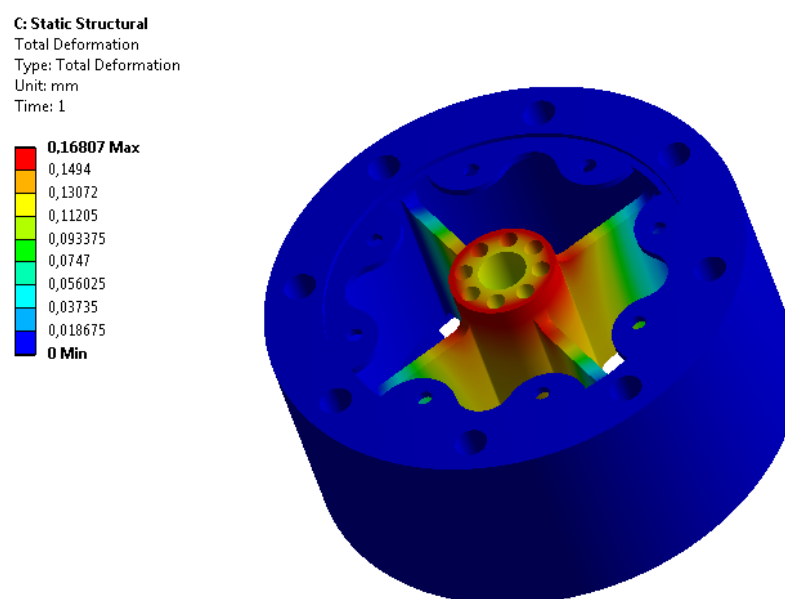
### 5.3 Výpočet napětí a deformace při působení momentu i síly



Obr. 5.7 Průběh redukovaného napětí při zatížení momentu  $M$  a síly  $F$ , vypočtené pomocí hypotézy HMM; [ MPa ]



Obr. 5.8 Místo s maximálním napětím, [ MPa ]



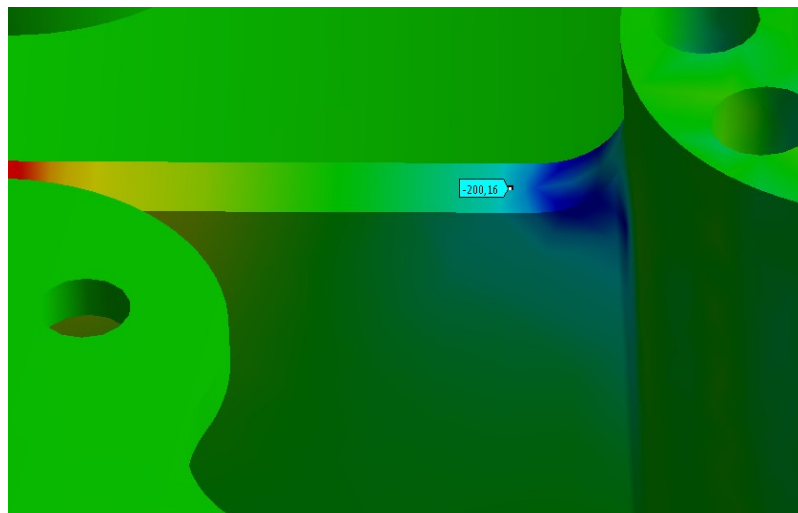
Obr. 5.9 Průběh celkového posunutí; [ mm ]

Velikost deformací při působení síly i monetu jsou rovny hodnotě 0,168 mm.



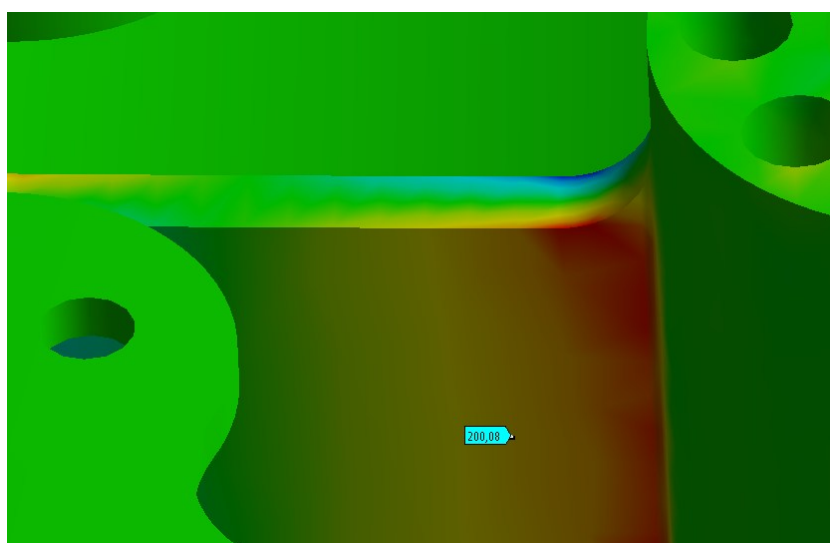
## 6 Rozmístění tenzometrů na snímači

Snímač byl modelován tak, aby zatěžující síla i moment vyvolali na paprscích napětí v rozmezí 200 – 220 MPa. Na těchto definovaných místech budou přilepeny tenzometry



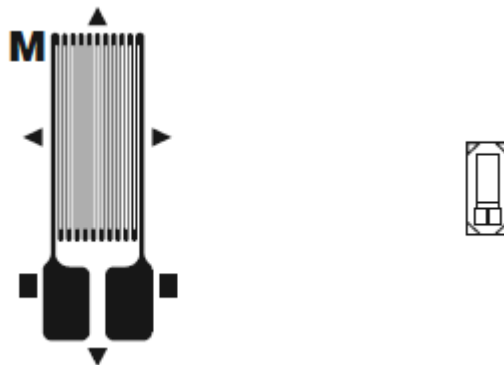
Obr. 6.1 Průběh normálového napětí ( pro případ zatížení silou )v ose x

Na obrázku je také ukázáno místo s požadovaným napětím 200 MPa pro umístění tenzometrů



Obr. 6.2 Průběh normálového napětí ( pro případ zatížení momentem )v ose x

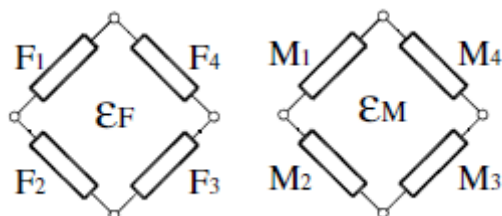
Na znázorněných místech na snímači budou přidělané elektrické odporové tenzometry, konkrétně typ N2A – 06 – T019M – 350, z katalogu firmy VISCHAY, která patří mezi světovou špičku. Tento typ tenzometrů byl vybrán kvůli lepší citlivosti než je u ostatních typů elektrických tenzometrů.



Obr. 6.3 tenzometr N2A – 06 – T019M – 350;[7]

šířka	délka	šířka mřížky
3,18	5,1	1,52

Tabulka 1: Základní rozměry tenzometru



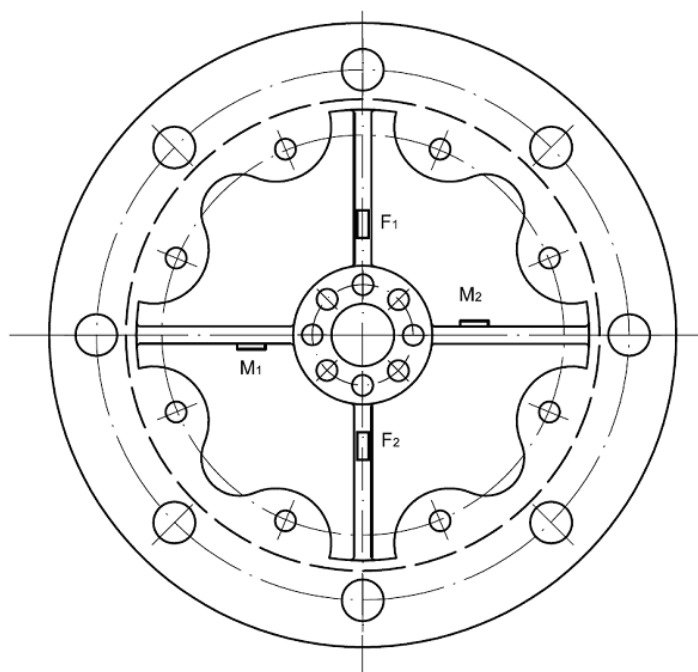
Obr. 6.4 zapojení tenzometrů do Wheatstonova můstku

Výpočet deformací pro zapojení do celého Wheatstonova můstku se realizuje podle vztahu:

$$\varepsilon = \frac{1}{2(1+\mu)} \frac{4}{k} \frac{U_m}{U_b} \quad [2]$$

### 6.1 Schéma rozmístění tenzometrů

Schéma bylo vykresleno v rozhraní programu Autodesk AutoCAD 2010

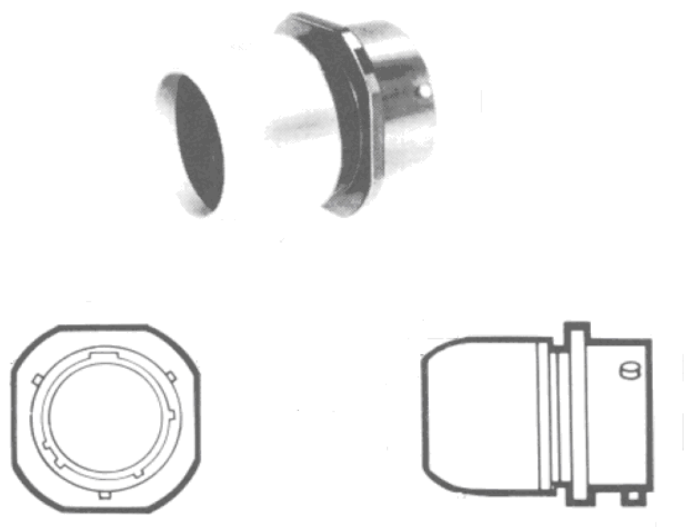


Obr. 6.3 Schéma rozmístění tenzometrů

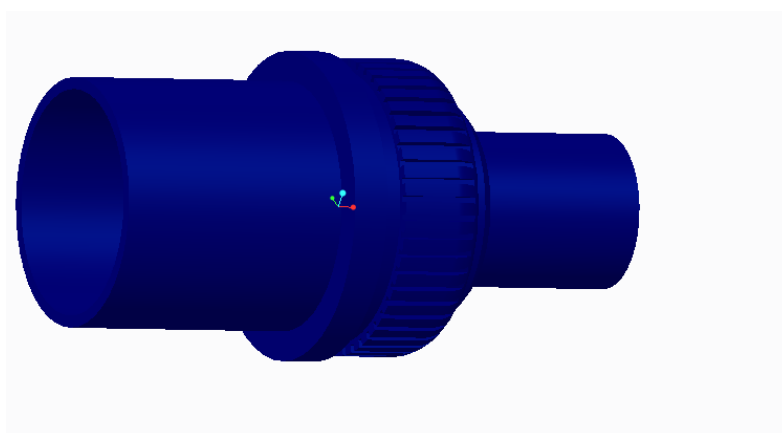
## 7 Připojení snímače

Snímač je nakonec opatřen těsněním, přírubou, šrouby pro uchycení, konektory a připojen do statické aparatury firmy VISHAY

Z internetového katalogu firmy FARNELL byl vybrán šesti-žilný konektor s označením 62GB – 11P.

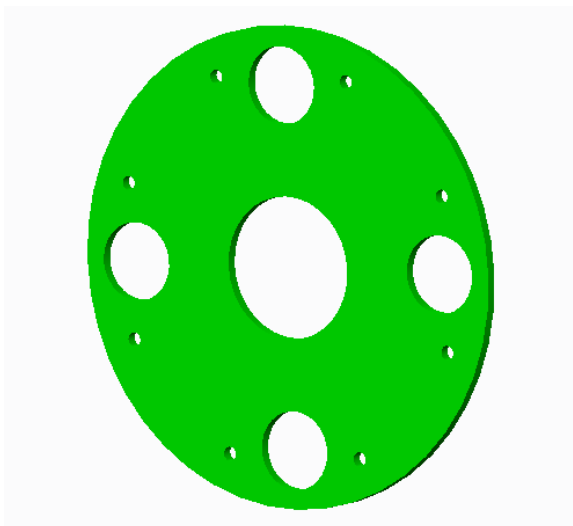


Obr. 7.1 konektor 62GB-11P



Obr. 7.2 konektor vymodelovaný v programu PTC Creo

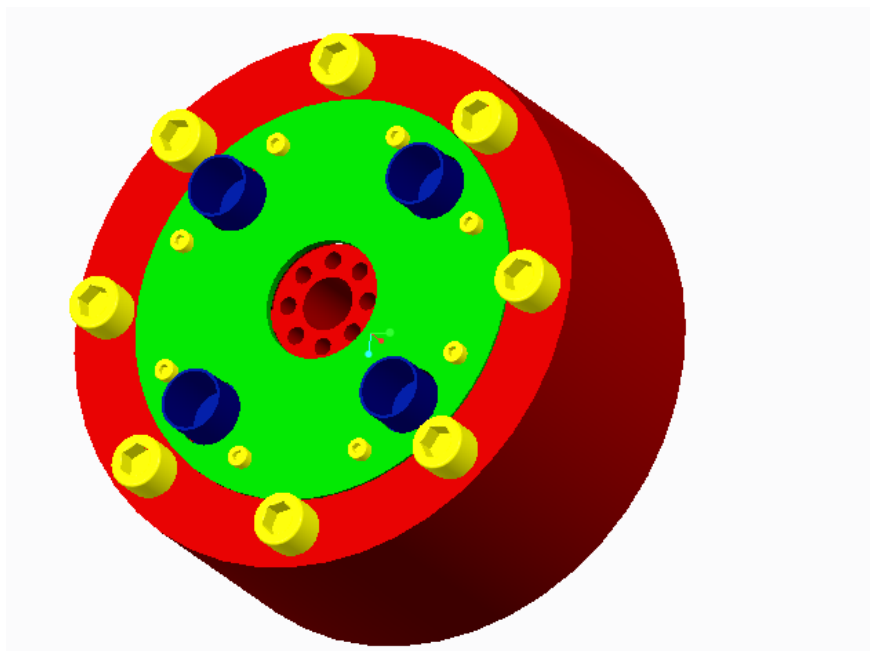
Pro snímač byla dále zhotovena příruba, jednak pro ochranu tenzometrů (chráněny prachovkou umístěnou pod víkem příruby), tak i z designového hlediska. Pod přírubou se bude dále nacházet těsnění a ochranná prachovka. Materiál příruby je zvolen hliník s modulem pružnosti v tahu  $E = 7,07 \cdot 10^{10}$  Pa, modulem pružnosti ve smyku  $G = 2,64 \cdot 10^{10}$  Pa a Poissonovým číslem  $\mu = 0,34$ .



Obr 7.3 . Příruba vymodelována v programu PTC Creo



Obr. 7.4 Statická aparatura od firmy VISCHAY [7]



Obr. 7.5 Celkový pohled na snímač s těsněním, přírubou, šrouby i konektory

## 8 Závěr

Bakalářská práce se zabývala MKP analýzou sdruženého snímače, tedy snímače zatíženého silou  $F$  a momentem  $M$ .

V teoretické části jsem popsal v současnosti používané snímače, jejich vlastnosti a užití. Zejména charakteristiky snímačů sloupcovitého a diskového typu. Na základě této studie jsem navrhl snímač, který vychází z konstrukce diskového typu. Tento snímač byl podroben analýze metodou konečných prvků. Snímač byl rozložen na elementy (konečné prvky) a byly na něm zavedeny geometrické a statické okrajové podmínky. Je také uveden výpočet bezpečnosti navržených šroubů. Poté byla provedena napěťově deformační analýza od působení síly, momentu a při kombinaci obou zatěžujících veličin.

Celý postup návrhu a výpočtu MKP byl uskutečněn v programu ANSYS Workbench 13.0.

Snahou bylo, aby na paprscích bylo vyvoláno napětí kolem 200 – 220 MPa, kde budou později lepeny tenzometry firmy VISHAY, tato část se musela několikrát opakovat, navržené snímače neodpovídali některým daným požadavkům (rozměry paprsků, velikost průměrů...), v této práci jsem zpracoval až šestou verzi snímače.

Na závěr práce byla navržena příruba s těsněním a ochranou prachovkou a připojení šesti-ti žilného konektoru od firmy FARNELL.

## Použitá literatura

- [1] STEFANESKU, D., M.: Handbook of Force Transducers – Principles and Components, Springer, 2011, ISBN 978-3-642-18295-2.
- [2] MACURA, P. Experimentální metody v pružnosti a plasticitě, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2001, ISBN 80- 7078-934-4
- [3] Produktové katalogy firem Interface, Ati-Theta
- [4] LENERT, J. Úvod do metody konečných prvků. 1. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1999, ISBN 80-7078-686-8
- [5] Ansys Inc. Documentation for ANSYS Release 13.0. SAS IP, Inc., 2011.
- [6] NĚMČEK, M., Řešené příklady z částí a mechanismů strojů. Spoje. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, ISBN 978-80- 248-1782-8
- [7] Produktový katalog firmy VISCHAY
- [8] LEINVEBER J., VÁVRA P., Strojnické tabulky- čtvrté doplněné vydání, Praha, 2008, vydavatel: Albra – pedagogické nakladatelství, ISBN 978-80- 731-051-7



## **Seznam příloh**

**Příloha 1: Výrobní výkres snímače**

**Příloha 2: Výrobní výkres příruby**